

Dynamics of Molecular Cloud Ensemble In Galaxies (銀河における分子雲系のダイナミクス)

著者	福長 正考
号	810
発行年	1983
URL	http://hdl.handle.net/10097/24520

氏名・(本籍)	ふくながまさたか 福 長 正 考
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理 博 第 8 1 0 号
学位授与年月日	昭 和 58 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研 究 科 専 攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 天文学専攻
学 位 論 文 題 目	Dynamics of Molecular Cloud Ensemble in Galaxies(銀河 における分子雲系のダイナミクス)
論文審査委員	(主査) 教 授 高 窪 啓 弥 教 授 須 田 和 男 教 授 高 橋 真 一

論 文 目 次

Summary

Chapter I. Introduction

1. Interstellar Medium as a Fluid
2. Viscosity Coefficient

Chapter II. Radial Distribution of Giant Molecular Clouds (GMCs) I: The Consequences of Viscous Torque of GMC System

1. Introduction
2. Viscosity Coefficient
3. Dynamics of Viscous GMC System
4. Discussion
5. Conclusion

Chapter III. Radial Distribution of Giant Molecular Clouds II: Application to External Galaxies

1. Introduction

2. Viscous GMC System

3. Discussion

4. Conclusion

Chapter IV. On the Random Motion of Giant Molecular Clouds

1. Introduction

2. Steady State Tensors for Colliding System in the Differentially Rotating Disk

3. Results

4. Meanings of Two Values of Random Velocity

5. Dynamical Friction by the Stellar System

6. Conclusion

Appendix: Gravitational Encounter Terms

Chapter V. Concluding Remarks

Acknowledgement

論文内容要旨

第1章 序論

星間ガスは一様ではなく 10^5 以上の密度及び温度の幅を持った少なくとも3種の相からなっている。従って星間ガスの流体的振舞を取扱うには各相間の素過程を取扱うことが非常に重要になる。一方、星間ガスの流体的な性質のうち支配的な性質は質量を最も多く含む相の振舞によって決定されるであろう。その様な相は議論の余地もあろうが、一般的には巨大分子雲($M > 10^5 M_\odot$)であると考えられる。CO分子線の観測によると、銀河の光学的に見える円盤内で巨大分子雲の全質量は他の星間ガスの少なくとも2～3倍あると見積られている。従って、銀河内の巨大分子雲の振舞を調べることは特に重要である。本論文は個々の分子雲を1個の分子とするガス流体とみなし得る範囲において巨大分子雲系を研究する。

第2章 巨大分子雲の銀河分布について I：粘性の効果

個々の巨大分子雲(GMC)を1個の分子と見なす場合 GMC の寿命が問題となるが、ここでは衝突時間以上にわたって GMC は安定であると仮定する。この仮定は GMC を分子とみなしたガス流体の中で巨視的な運動量の伝達が GMC 相互の衝突を通じてなされるために必要であろう。またこの仮定は GMC に含まれるガスの質量が他の星間物質の質量に比べ大きいことから間接的に保証されていると考えられる。

さて、GMC 系では平均自由行程がエピサイクリック半径より長いため粘性係数は

$$\eta \simeq N c_r^2 f / \kappa^2 \quad (1)$$

と与えられる(N は GMC の数密度, c_r はランダム速度の銀河半径成分, κ はエピサイクリック振動数, f は衝突頻度)。この形で表わされる粘性係数の特徴は、それが密度依存性をもつことである($f \propto N$)。このため粘性トルクがゼロになる様な密度分布の存在を示すことができる。今、 $N \propto r^{-1}$ とおき、粘性トルクがゼロになる様な分布を $\lambda = \lambda_0$ であるとする(r は銀河中心からの距離)。銀河重力場を軸対称とし、重力に釣合う円回転の角速度が半径の増加とともに減少すると仮定する。この時、密度分布 λ が λ_0 に等しければ GMC 系(以下ガスと言う)は角運動量は変化せずガスの流れはない。 λ が λ_0 より小さければ、ガスは角運動量を失い、中心に向かって落下する。一方 λ が λ_0 より大きければガスは角運動量を得て外に向って膨張する。 λ_0 の値は V_{rot} を円回転の速度として、

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 1.5 & (V_{\text{rot}} = \text{一定}) \\ \lambda_0 &= 1.75 & (V_{\text{rot}} = r^{-0.5}) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

一般的に(1)式で表わされる粘性係数をもつガスの存在は中心力場内での角運動量輸送問題について明確な描像を与える。今、中心力場内で重力とりあってほぼ円差動回転(circular differential rotation)する有限質量、有限半径のガス円盤を考える。(外場によるトルクは考えない。)

ガスの密度が高く、平均自由行程 ℓ がエピサイクリック半径より短いとき、 c をランダム速度として、粘性係数は、

$$\eta_2 \approx \frac{1}{3} N c \ell \quad (3)$$

となる。よく知られている様に η_2 は密度に依存しない ($\ell \propto N^{-1}$)。このため η_2 の粘性係数を持つ密度の高い領域のガスは、ランダム速度が一定とすると、常に角運動量を失ない、中心に向かって落下する。一方、円盤の周辺部ではガスは希薄となり、平均自由行程はエピサイクリック半径より長くなる。この時粘性係数は η_1 である。ガスの質量が有限な場合、(2)式よりわかる様に必ず最外縁部の密度分布 λ は λ_0 より大きくなる。この部分のガスは内側のガスの失った全ての角運動量を受け取り、外に向って膨張する。系の全角運動量は、この過程の中で保存している。

銀河系や多くの円盤銀河の GMC 系の粘性係数は η_1 で与えられる。又銀河回転は中心付近では剛体回転に近く、外側では差動回転である。また GMC の分布の変化によって殆んど影響されないと思われる。この様な場合の粘性 GMC 系(以下3章の終までガスと言う)の振舞は以下の様である。仮りに初期においてガスはある半径内に一様に分布しているものとする。この場合、前段と同様に周縁部の分布は $\lambda > \lambda_0$ であり、ガスは外に向って膨張する。内部では $\lambda < \lambda_0$ なので中心に向かってゆるやかに落下する。ガスは、このため、剛体回転と差動回転の遷移領域に環状に集積する。また環の外側のガス分布は粘性トルクがゼロになる分布 ($\lambda = \lambda_0$) に近づく(図1)。我々の銀河の5-kpc 分子雲リング(図4)はこの様にして形成されたと考えられる。

第3章 巨大分子雲の銀河分布について II：系外銀河への適用

銀河回転はほぼ4種の型に大別できる。すなわち、I型、剛体+差動；II型、速度一定；III型、二個の極大；IV型、剛体的、の4種である。(IV型の銀河ではガスに働くトルクがゼロなので、ガスの角運動量は変化しない。II型については中心まで一定とは考えにくく、I型のうち剛体部分の半径の小さい銀河である可能性が強い。)この章では、いくつかの型の銀河の粘性ガスの振舞を数値計算によって調べた。第2章で述べた様にガスの粘性係数は η_1 である。衝突の頻度としては GMC の重力遭遇によるものとし、GMC の質量は $3 \times 10^5 M_\odot$ 、ランダム速度は 10 kms^{-1} とした。

図1はI又はII型の回転をする銀河の中でのガス密度の変化を示したものである。各曲線上の数字は、経過時間を 10^9 年単位で示したものである。ここで n_{H} は GMC に含まれる水素を星間空間にならした個数密度である。図に示される様に計算結果は第2章で述べた定性的な振舞によく従っている。図2はII型の銀河についてこれまでに観測されている CO 分子線強度の分布を示したものである。CO 分子の線強度 (I_{CO}) は H_2 分子の面密度又は GMC の面数密度を表わすと考えられている。図中の直線は $V_{\text{rot}} = \text{一定}$ の場合の粘性トルクがゼロの密度分布 ($\lambda = \lambda_0 = 1.5$) を示すものであり、各銀河の分布は $\lambda_0 = 1.5$ の分布とよく一致する。この様にして、ガスの密度と面密度が比例関係にあるなら、図2に示される観測結果はガス分布が粘性によって

与えられる一つの証拠となるであろう。

III型の回転曲線をもつ銀河内のガス密度変化を図3に示す。回転曲線は我々の銀河系の回転に近いものを使った。密度の極大が2ヶ所回転速度極大のやや内側に現れている。図4は我々の銀河系のCO分子線の強度分布を示している。下の図は観測された回転曲線である(Burton and Gordon 1978)。図3と図4を比べて解かる様に我々の計算結果は観測結果とよく一致している。

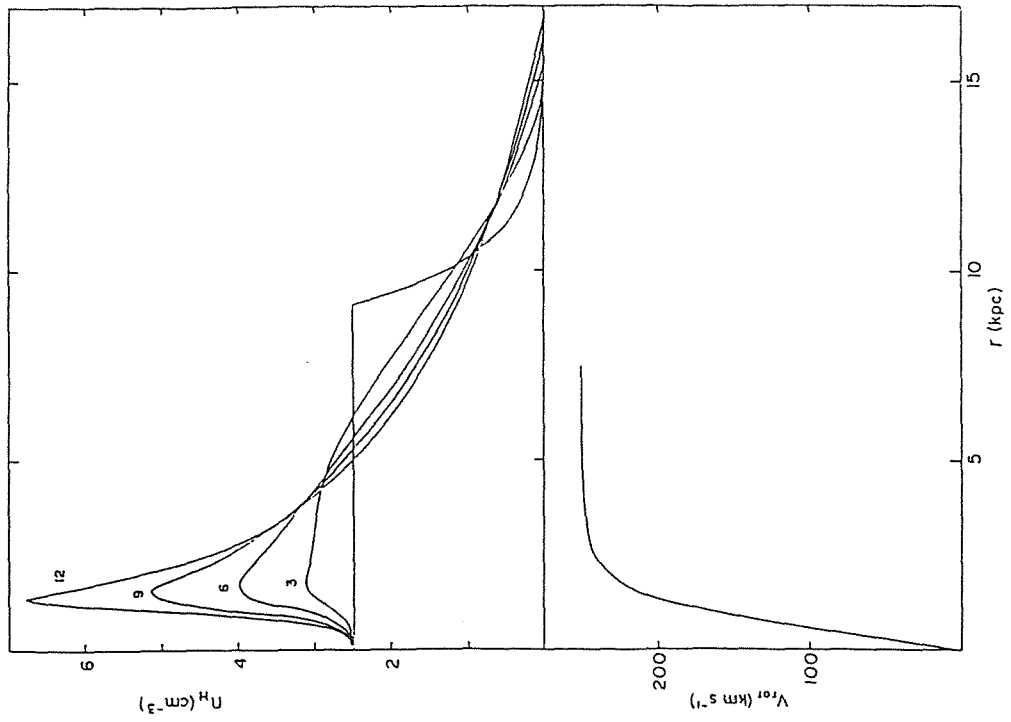
以上により、GMCを1分子と見なした粘性 η の効果によって円盤銀河の分子雲分布がよく説明できることがわかる。なお、図1, 3の計算においてはガスの全角運動量は0.1–0.2%の誤差の範囲内で保存されていることを注意しておく。

第4章 巨大分子雲のランダム運動について

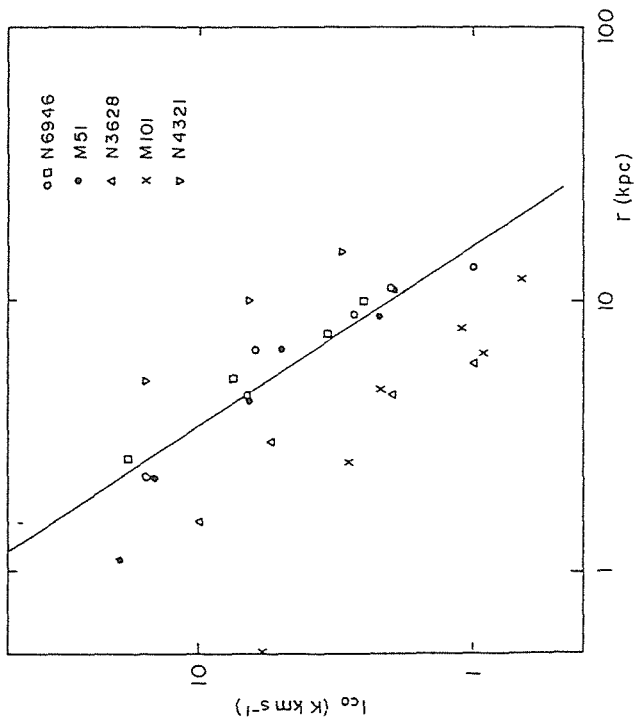
粘性がGMC系で有効に働くには、GMCが有限のランダム速度を持っていることが必要である。この章では、粘性による系の加熱が有効に働き、GMC系は十分なランダム速度を持ち得ることを示す。GMCは質量が大きいためGMC間の重力相互作用が系の緩和に有効である。また、重力遭遇は完全弾性的なのでGMC系は粘性による加熱(ランダム速度の増加)が可能である。一方、直接衝突は非弾性的と考えられ、系を冷却(ランダム速度の減少)する。この加熱、冷却により一定のランダム速度が得られるのである。

衝突項として重力遭遇と直接衝突を考え、2次のBoltzmann方程式を差動回転する系の中で解くことにより定常なランダム速度 σ を密度の関数として得た。GMCの密度 N がある値 N_M より大きい場合、有限定常な解は存在しないが、これは常に冷却が加熱を上まわることによる。 N が N_M より小さい場合、2種の解 σ_u, σ_e ($\sigma_u > \sigma_e$)が存在する。 σ_e は熱力学的に不安定な解であり、小さな摂動により、ランダム速度は σ_e から離れ、ゼロ又は σ_u に近づく。一方、 σ_u は安定な解で、 $N < N_M$ の範囲で密度によらずほぼ一定であり、衝突の時間以上の時間を問題にする場合には、系は等温的であると言ってよいであろう。我々の銀河系で観測されるGMC各量(大きさ \sim 数+pc, 数量 $\gtrsim 10^5 M_\odot$)を使用した計算はGMC層の厚さから見積られるランダム速度をよく説明する。

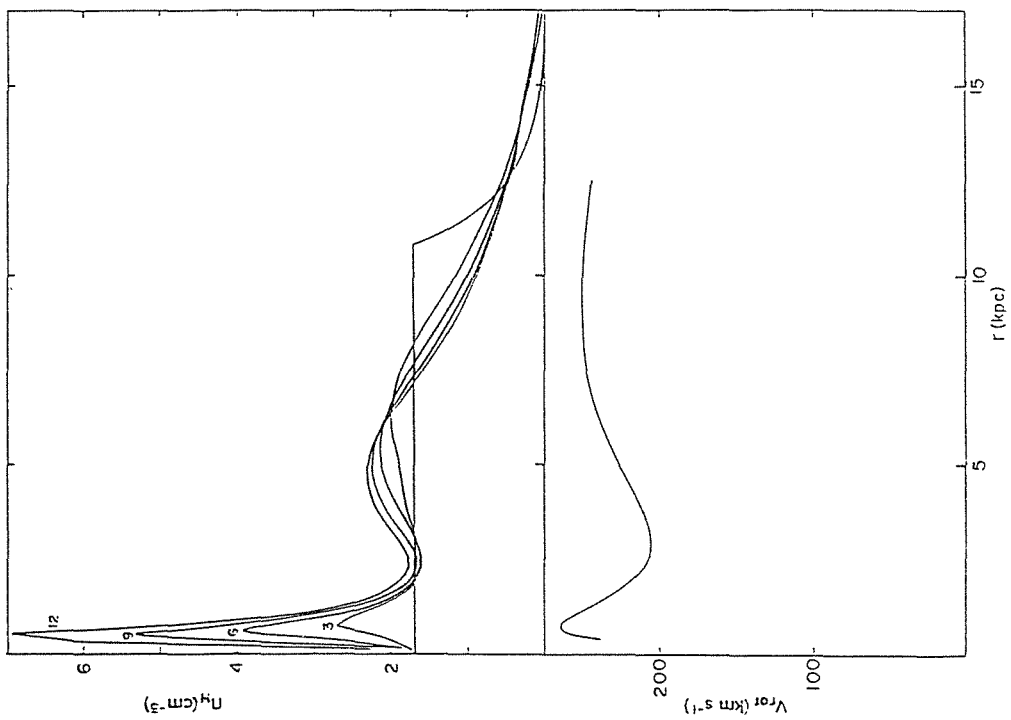
初期にランダム速度がゼロの場合には、ランダム速度を σ_u にいかに加熱するかが問題である。今回の計算では重力遭遇について、差動回転の効果を考慮していないが、このため不安定解 σ_e が生じたものと考えられる。ランダム速度が小さい場合の差動回転の効果を取入れた計算によると、ランダム速度がゼロからでも有限なランダム速度($> \sigma_e$)が得られることが示される。



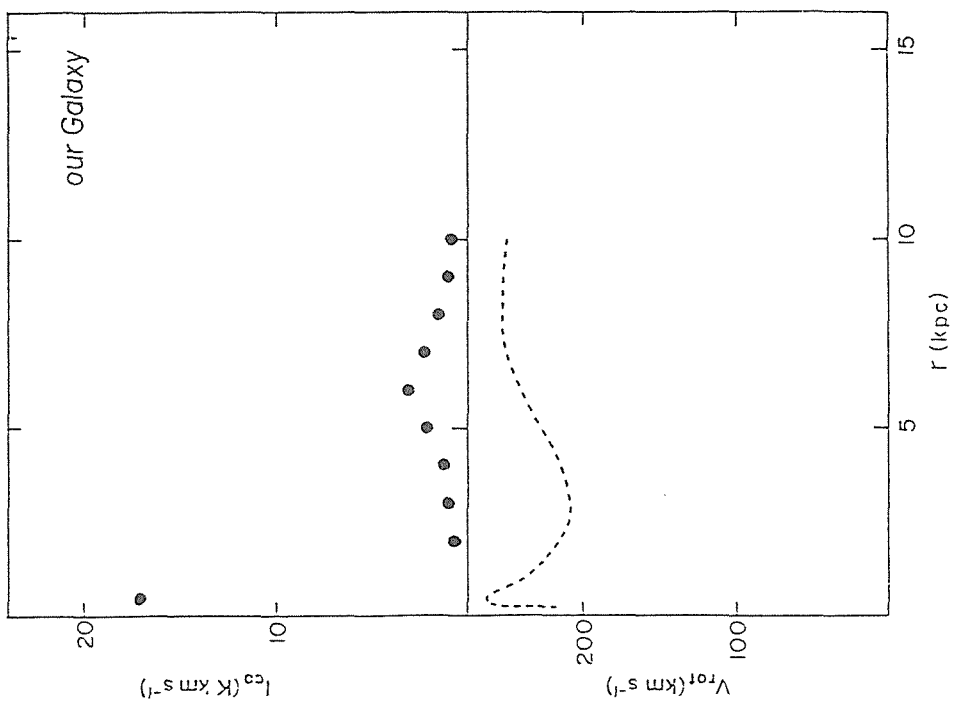
(图 1)



(图 2)



(图 3)



(图 4)

論文審査の結果の要旨

銀河円盤内部に分布する星間媒質の主成分は水素ガスであり、この水素は主として中性原子または分子の状態にある。水素分子は、太陽近傍を除けば、直接に観測することができない。しかし、一酸化炭素分子の輝線スペクトルを測定することによって、間接的にはあるが、水素分子の銀河内分布が知られるようになった。その結果によれば、分子は多数の巨大な雲、すなわち「巨大分子雲」に集中している。その質量はきわめて大きく、また密度も大きいので、星間媒質の質量の過半を巨大分子雲が占めていると考えられる。また、その寿命もかなり長く、巨大分子雲を一つの粒子として考え、巨大分子雲の系を、そのような粒子を構成分子とする「流体」として近似的に取扱うことが可能になる。

本論文は、以上の点に着目し、銀河内「分子雲流体」の力学で重要な粘性係数を定式化し、恒星の質量分布で定まる重力場における分子雲流体の振舞を論じ、かつ、この流体の内部運動の励起に関して考察することを目的としたものである。

この流体の粘性は巨大分子雲相互間の運動量伝達によって生じ、銀河回転に伴ってトルクを発生する。しかし、この粘性の特殊性のために、流体の密度分布が或る特別な場合には粘性トルクがゼロになる。実際の密度分布がこの特別な場合と違う場合には、角運動量の伝達に伴って流体の密度分布が変化し、結局は、至る所粘性トルクがゼロの状態に達するであろう。この理論的な帰結は数値的にも確かめられ、銀河系に見られる分子の環状分布を見事に説明するとともに、回転曲線および一酸化炭素分子が測定されている他の銀河についても分子雲の分布をよく説明する。

上述の粘性が有効なためには個々の分子雲のランダムな運動がなければならない。この運動は重力遭遇によって増加し(すなわち加熱)、直接衝突によって減少する(すなわち冷却)。加熱と冷却が釣り合った定常な場合のランダム速度は密度の関数であり、解が存在する場合には二価関数となる。しかし、一方の解のみが安定であり、その値は銀河系で観測されるものとよく一致する。

以上、本論文によって提唱された巨大分子雲系の力学は、銀河系および他の円盤銀河内の分子分布をよく説明し、銀河の構造・内部運動などを理解するのに極めて重要であると考えられる。また、本論文は著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有することを示すものである。よって福長正考提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。